

## CUANTIFICACIÓN DE LA EROSION Y SEDIMENTACIÓN EN SUELOS MEDITERRÁNEOS MEDIANTE LA CALIBRACIÓN DE MEDIDAS DE CESIO 137

A. NAVAS,<sup>1</sup> J. SOTO<sup>2</sup>, J. MACHÍN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Estación Experimental de Aula Dei. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Apartado 202. 50.080 Zaragoza. Spain. anavas@eead.csic.es.

<sup>2</sup> Dpto. Ciencias Médicas y Quirúrgicas. Universidad de Cantabria. Avda. Cardenal Herrera Oria s/n. 39011 Santander. Spain.

**Abstract.** In this work we present the results of the application of various models to calibrate the <sup>137</sup>Cs data in order to quantify erosion and sedimentation rates. Various models have been applied on 17 soil profiles in which <sup>137</sup>Cs activities have been measured. Of these, 10 correspond to eroding profiles and 7 are aggrading. The rates of erosion and aggradation calculated are similar and no significant statistical differences have been found. The selected models are easily applied and do not require parameters difficult to obtain. Nevertheless, these soils characterised by highly variable properties and high stoniness require specific models suitable for the special features of the Mediterranean environments.

**Key words:** Erosion, aggradation, calibration, models, <sup>137</sup>Cs.

**Resumen.** Se presentan los resultados de un estudio comparativo de modelos para cuantificar la erosión y sedimentación. Distintos modelos se han aplicado a 17 perfiles de suelo en los que se ha medido la actividad de <sup>137</sup>Cs. De estos perfiles, 10 son de erosión y 7 de depósito. Las velocidades de erosión y sedimentación calculadas son estadísticamente similares. Los modelos son fácilmente aplicables y no requieren parámetros difíciles de obtener. No obstante, las características de los ambientes edáficos mediterráneos requieren el desarrollo de modelos adaptados a estos suelos que presentan gran variabilidad espacial y pedregosidad.

**Palabras clave:** Erosión, sedimentación, calibración, modelos, <sup>137</sup>Cs.

### INTRODUCCIÓN

En diversos ambientes mediterráneos la erosión puede ser un factor básico de degradación del suelo (Navas y Machín, 1991; Navas, 1993). En las zonas áridas y semiáridas de España son abundantes los agroecosistemas afectados por la erosión hídrica

siendo en algunos casos de tal intensidad que llega a eliminar horizontes completos del perfil edáfico. Para implementar medidas de protección de suelo en áreas que presentan alto riesgo de desertificación es necesario cuantificar la erosión. Se trata de determinar si las velocidades de erosión se equiparan con las de formación o en caso

contrario si la pérdida de suelo puede llegar a ser irreversible.

Para cuantificar la erosión y sedimentación se utilizan modelos que relacionan la pérdida o ganancia de suelo con la pérdida o ganancia de  $^{137}\text{Cs}$ . Existen diferentes métodos que en base a distintas asunciones suponen la existencia de un determinado perfil de concentración del radioisótopo en un emplazamiento determinado que corresponde a un valor puntual de radioactividad por unidad de superficie (Walling y He, 1999). No obstante, la aplicación de distintos modelos a los mismos valores experimentales de carga total de  $^{137}\text{Cs}$  proporcionan resultados de tasas de erosión diferentes (Walling y Quine, 1990). El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de la aplicación de distintos modelos a un total de 17 perfiles de  $^{137}\text{Cs}$  medidos en 10 puntos de erosión y 7 de depósito. Los modelos han sido seleccionados tras una revisión previa y entre los factores que se han considerado para su aplicación son la sencillez de uso y no necesitar gran cantidad de parámetros para el cálculo de las velocidades de erosión y sedimentación.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El  $^{137}\text{Cs}$  es un radioisótopo artificial producto de los ensayos nucleares atmosféricos realizados a partir de los años 1950 hasta 1970, que se distribuyó globalmente en la estratosfera y se depositó con la lluvia y precipitación seca a partir de 1954, alcanzando su pico máximo de depósito en 1963. Por ser altamente reactivo, su incorporación en suelos y sedimentos es rápida y queda fuertemente adsorbido en arcillas y partículas orgánicas. Es esencialmente no intercambiable y su redistribución ocurre en asociación con partículas del suelo por procesos de erosión y sedimentación (Rogowski y Tamura, 1970). Las características de este radiotrazador y su aplica-

ción en ambientes mediterráneos se detallan en Navas (1995).

El uso del  $^{137}\text{Cs}$  para cuantificar la erosión requiere en primer lugar determinar su carga de referencia en el área de estudio. Para ello se procede al muestreo de emplazamientos estables, no afectados por procesos de erosión o depósito. La distinción entre lugares erosionados o de depósito se determina por la desviación respecto a un valor de referencia de los valores radioisotópicos medidos. Finalmente, la velocidad de erosión en un área se puede determinar mediante la calibración de los datos radioisotópicos, estableciendo una relación cuantitativa entre la pérdida y ganancia de  $^{137}\text{Cs}$  y la cantidad de erosión y depósito.

Se han muestreado 17 perfiles de suelos cuyas muestras se seccionan a intervalos de 5 cm; una vez secas al aire se tamizan (2 mm) y se analiza el  $^{137}\text{Cs}$  mediante un detector coaxial de germanio hiperpuro (EG&G ORTEC HPGe) de alta resolución y baja energía acoplado a un amplificador y analizador ORTEC multicanal. El detector con una eficiencia del 20%, resolución de 1,86 keV mide las emisiones gamma de  $^{137}\text{Cs}$  (662-keV). El tiempo de conteo es de 30000 s lo que proporciona una precisión analítica de las medidas en torno al 10%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los perfiles erosionados de  $^{137}\text{Cs}$  tomados en suelos no cultivados presentan una forma característica de disminución exponencial de la concentración en profundidad, el 75% de la actividad del radioisótopo se acumula en los 15 cm superiores. Además, la actividad de  $^{137}\text{Cs}$  es significativamente inferior a la medida en perfiles estables de referencia.

Para cuantificar la erosión a partir de las medidas de  $^{137}\text{Cs}$  en estos perfiles de erosión se ha utilizado un modelo proporcional (D) propuesto por de Jong *et al.* (1983) y

otro modelo que ajusta perfiles experimentales a funciones exponenciales (C) basado en el de Zhang *et al.* (1990) y modificado por Chappell *et al.* (1998).

La tasa de erosión se calcula como sigue:

Aplicando el modelo D:

$$Er = ({}^{137}\text{Cs ref} - {}^{137}\text{Cs punto} / {}^{137}\text{Cs ref}) \cdot M / Y.$$

donde, Er es la velocidad de erosión (t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), <sup>137</sup>Cs ref es la actividad total de referencia del <sup>137</sup>Cs (Bq m<sup>-2</sup>) en los primeros 15 cm de suelo (promedio de 9 puntos), <sup>137</sup>Cs punto es la actividad de <sup>137</sup>Cs (Bq m<sup>-2</sup>) en los primeros 15 cm de suelo en los perfiles erosionados, M es la masa en un volumen de suelo de 15 cm de profundidad por una hectárea de superficie, Y es el número de años comprendidos entre el depósito del radioisótopo y su muestreo y análisis.

Aplicando el modelo C:

$$X (\text{pérdida de } {}^{137}\text{Cs}) = (R - A) / R.$$

Donde A es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto erosionado y R es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto de referencia.

Además :

$$Y (\text{pérdida de suelo en t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}) = - (B / 10 \cdot S \cdot P) \ln (1 - X).$$

donde B es la densidad aparente (kg m<sup>-3</sup>), S es el factor de forma del perfil que se ha calculado para los perfiles estudiados entre 0.10 y 0.11. P es el número de años transcurridos desde el depósito del radioisótopo.

Los perfiles de depósito presentan un aumento de la concentración de <sup>137</sup>Cs en el horizonte superficial del suelo en relación a los de referencia y son generalmente mas alargados. Para cuantificar la velocidad de sedimentación a partir de las medidas de

<sup>137</sup>Cs para perfiles de depósito se ha utilizado un modelo gravimétrico (G) basado en el de Brown *et al.* (1981) que transforma la cantidad en exceso de <sup>137</sup>Cs en el perfil en masa de suelo y otro modelo (C) desarrollado por Chappell *et al.* (1998).

La tasa de sedimentación se calcula como sigue:

Aplicando el modelo G:

$$Y (\text{ganancia de suelo en t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}) = 10 (A - Aref) / C T.$$

Donde A es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto de depósito y Aref es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto de referencia, C es la concentración promedio de <sup>137</sup>Cs en los primeros 5 cm de los puntos del entorno que aportan los sedimentos (Bq kg<sup>-1</sup>) y T es el número de años transcurridos desde el depósito del radioisótopo.

Aplicando el modelo C:

$$X (\text{ganancia de } {}^{137}\text{Cs}) = (A - R) / A.$$

Donde A es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto de depósito y R es la actividad total de <sup>137</sup>Cs por unidad de área (Bq m<sup>-2</sup>) en el punto de referencia.

Además:

$$Y (\text{ganancia de suelo en t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}) = (10 \cdot D \cdot B \cdot F / T) X.$$

donde B es la densidad aparente (kg m<sup>-3</sup>), D es la profundidad de la muestra que contiene el perfil de <sup>137</sup>Cs (0,5 m para los perfiles estudiados), F factor de retención relacionado con la vegetación (0.1), T es el número de años transcurridos desde el depósito del radioisótopo.

En la tabla 1 se resume la estadística básica de los resultados obtenidos tras la aplicación de estos modelos para el cálculo

**TABLA 1:** Estadística básica de las velocidades de erosión y sedimentación calculadas según los modelos aplicados.

	<b>erosión</b>		<b>sedimentación</b>	
	t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>			
	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>G</b>	<b>C</b>
<b>n</b>	10	10	6	7
<b>media</b>	13.62	10.82	2.67	1.03
<b>varianza</b>	51.90	91.36	3.35	0.39
<b>desviación estándar</b>	7.20	9.56	1.83	0.62
<b>mínimo</b>	5.20	2.00	0.20	0.10
<b>máximo</b>	24.80	29.50	5.80	2.20
<b>skewness estándar</b>	0.46	1.79	0.75	0.83
<b>kurtosis estándar</b>	-0.83	0.44	1.05	1.46

de las velocidades de erosión y sedimentación de los perfiles correspondientes.

En la Figura 1 se representan los valores de las medias, cuartiles y desviación estándar. Las medias de las velocidades de erosión calculadas para los 10 perfiles de erosión según los modelos D y C son bastante similares sin que entre ellos existan diferencias estadísticamente significativas. Aunque las medias de velocidades de sedimentación calculadas según el modelo gravimétrico son superiores, tampoco estas diferencias son estadísticamente significativas.

Se han realizado una serie de análisis estadísticos: t-test de comparación de medias, F-test de comparación de varianzas, Mann-Whitney W test de comparación de medianas y Kolmogorov-Smirnov test para comparar las distribuciones de las muestras y no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Únicamente se ha encontrado que las diferencias entre las desviaciones estándar de las velocidades de sedimentación son estadísticamente significativas al 95%.

## CONCLUSIONES

Los modelos utilizados para el cálculo de la erosión y sedimentación a partir de las medidas de <sup>137</sup>Cs en los perfiles de suelos estudiados son de fácil aplicación, no requieren gran cantidad de parámetros de difícil obtención y las velocidades obtenidas son similares.

Frente a las ventajas mencionadas, señalar que los suelos mediterráneos se caracterizan por una amplia variabilidad espacial de numerosas propiedades de suelo y una alta pedregosidad, así como por otros factores tales como la heterogeneidad del paisaje y la distribución irregular de la vegetación. Por ello, se considera necesario desarrollar modelos específicos de cuantificación de la erosión y sedimentación apropiados para los ambientes edáficos mediterráneos que tengan en cuenta estos factores. En esta dirección se orienta nuestra investigación actual sobre el desarrollo de un modelo de perfil de actividad del radioisótopo que considera, entre otros, el efecto de la pedregosidad.

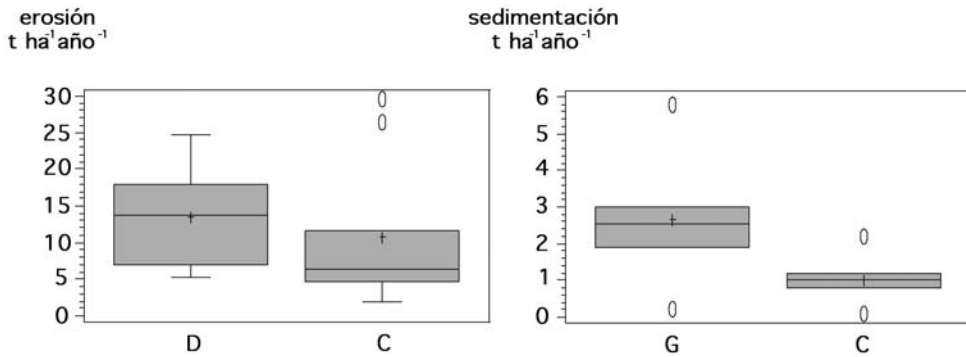


FIGURA 1: Gráficos box-whisker de las velocidades de erosión y sedimentación calculadas con los distintos modelos aplicados.

**AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación ha sido financiada mediante los proyectos CICYT “Evaluación de la erosión del suelo en agroecosistemas mediterráneos mediante cesio 137 y plomo 210 : factores, validación y modelización en una cuenca del valle del Ebro, RADIERO (REN2002-02702/GLO)” y “Evaluación de procesos de desertificación en agroecosistemas mediterráneos: modelización predictiva y radioisotópica, REM (CGL2005-02009/BTE).

**REFERENCIAS**

Brown, R.B., Kling, G.F., Cutshall, N.H. (1981). Agricultural erosion indicated by 137Cs redistribution: II. Estimates of erosion rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1191-1197.

Chappell, A., Warren, A., Oliver, M.A., Charlton, M. (1998). The utility of 137Cs for measuring soil redistribution rates in southwest Niger. *Geoderma*, 81: 313-337.

De Jong, E., Begg, C.B.M., Kachanoski, R.G. (1983). Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sc.*, 63: 607-617.

Navas, A. (1993). Soil losses under simulated rainfall in semiarid shrublands of the Ebro valley. *Soil Use Manage.*, 9 (4): 152-157.

Navas, A. (1995): Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo cesio-137. Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Geomorfología nº8. 16 p. *Geoforma Ediciones*. Logroño.

Navas, A. y Machín, J. 1991. A preliminary research on the use of cesium-137 to investigate soil erosion in the semiarid landscape of the central Ebro river valley. In: *Soil erosion studies in Spain*. Sala, M.; Rubio, J.L.; García-Ruiz, J.M. eds., 191-202.

Rogowski, A.S. y Tamura, T. (1970): Environmental mobility of caesium-137. *Radiation-Bot.* 10, 35-45.

Walling, D.E. y He, Q. (1999). Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *J. Environ. Qual.*, 28: 611-622.

Walling, D.E. y Quine, T.A. (1989). Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degrad. Rehabil.*, 2: 161-175.